

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181473

# 基于系统调峰约束的电网风电消纳水平研究

孙勇, 魏敏, 王磊, 郭阳, 罗艳, 王卓瑜

(国网新源控股有限公司, 北京 100068)

**摘要:** 电力系统调峰能力是制约电力系统消纳风电的主要因素。为了辅助风电发展规划及系统规划决策, 基于2017年东北电网电源、负荷特性、风电出力特性等, 提出了考虑系统调峰能力约束的电网风电消纳水平评估方法。该方法分析了东北电网调峰缺额及风电消纳水平, 提出促进风电消纳水平提升的措施和建议: 提高现有风电外送通道负荷率、加强建设优质灵活调峰电源、激励需求侧负荷参与系统调峰、完善东北电网调峰市场化补偿机制等。所提方法在辅助有关部门制定风力发电发展规划、电力系统规划时具有参考价值。

**关键词:** 风电; 系统调峰能力; 调峰缺额; 消纳水平

## Study on wind power consumption based on system peak regulation capability constrain

SUN Yong, WEI Min, WANG Lei, GUO Yang, LUO Yan, WANG Zhuoyu

(State Grid Xin-yuan Company Ltd., Beijing 100068, China)

**Abstract:** Power system peak regulation capability is a major factor restricting the power system's ability to absorb wind power. To assist in wind power development planning and system planning decisions, based on the power supply, load characteristics and wind power output characteristics of Northeast Power Grid in 2017, a grid wind power consumption level assessment method that considers the system peak regulation capacity constraints is proposed. The peaking of the Northeast Power Grid and the level of wind power consumption are analyzed, and measures and suggestions for promoting the level of wind power consumption are proposed, including improving the load rate of the existing wind power transmission channel, strengthening the construction of high-quality flexible peak regulation power supply, stimulating the demand side load to participate in the peaking of the system, and improving the compensation mechanism for the peaking market of the Northeast Power Grid. The proposed method has reference value in assisting relevant departments to formulate the scale of development of wind power generation and power system planning.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Key Techniques Research on Large-scale Pumped Storage Flexible Control" (No. 1D5746100001).

**Key words:** wind power; system peak regulation capability; peak regulation shortage; consumption level

## 0 引言

为了应对能源危机和环境污染, 各国都越来越重视风电的发展, 并且已在全球范围内大规模开发利用风电<sup>[1-2]</sup>。大规模风电并网增加了电力的供应, 有效缓解阶段性电力供需矛盾, 减少了环境污染, 但由于风电具有间歇性和随机性的特点, 也给电网的安全稳定运行带来很多问题<sup>[3]</sup>。随着风电并网容量的急剧增加, 电网调峰压力不断加大, 风电并网

和调峰问题日益凸显, 弃风现象比较突出<sup>[4]</sup>。对于大规模风电接入的电网, 常规电源参与调峰的能力可能无法满足需求, 因此需要尽可能挖掘常规电源的调峰潜力, 提高电网的调峰能力。东北电网是国家电网六大区域电网之一, 供电区域涵盖东北三省及内蒙古自治区东部三市一盟, 也是我国风电主要集中地之一, 风电装机占比在各区域电网中居首<sup>[5]</sup>。但是, 东北电网严重缺乏具有灵活调节能力的电源, 特别是冬季, 火电供热期与风电大发期重合, 面临居民供热和风电消纳双重任务, 水电也进入枯水期, 风电消纳被严重制约<sup>[6]</sup>。2017年国家能源局发布《关于2017年度风电投资监测预警结果的通知》, 红色、

基金项目: 国家电网公司科技项目资助“大型抽水蓄能灵活控制关键技术研究”(1D5746100001)

橙色、绿色代表风电弃风预警的三个等级，弃风率超过 20%的地区则被预警为橙色及以上，而内蒙古、黑龙江和吉林就占到被划定为红色预警区域的一半，风电消纳面临挑战<sup>[7]</sup>。因此，在进行风电规划发展前，有必要对东北电网消纳风电水平进行深入的探讨和研究。

本文主要结合东北电网的电源、网架及负荷特性，基于风电反调峰、系统调峰能力、负荷峰谷差、适当考虑联络线送受影响，分析东北电网调峰缺额，并计算 2016 年、2017 年、2020 年(预测)3 个水平年在调峰困难的冬季电网消纳风电水平，得出相关结论，提出促进风电消纳水平提升的相关措施和建议。研究方法在辅助有关部门制定风力发电发展规模以及电力系统规划决策时具备积极的参考价值。

### 1 东北电网源荷特性分析

#### 1.1 电网电源特性

火电和风电分别为东北电网第一、第二主力电源。截至 2017 年底，东北电网装机容量达 13 908.58 万 kW，其中火电装机容量 9 251.18 万 kW，占比 66.51%；风电装机容量 2 762.17 万 kW，占比 19.86%；水电(含抽水蓄能)装机容量 812.27 万 kW，占比 5.84%；核电和太阳能装机容量 1 082.96 万 kW，占比 7.9%<sup>[5]</sup>。从分析结果看，在风电大规模上网使得电网调峰需求更高、抽水蓄能等灵活调峰电源非常有限的情况下，火电作为东北电网的主力电源，风火互济的局面基本形成。通过东北电网 2016 年和 2017 年 22 个典型日调度运行数据分析如图 1 所示，在总发电过程中，风电与火电出力存在较为明显的线性负相关性，具有调节互补作用。即当风电出力增加时，会对应调低火电出力；当风电出力减小时，会对应调高火电出力，风火互济特点非常突出。

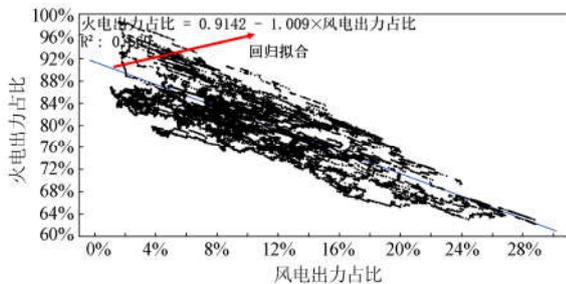
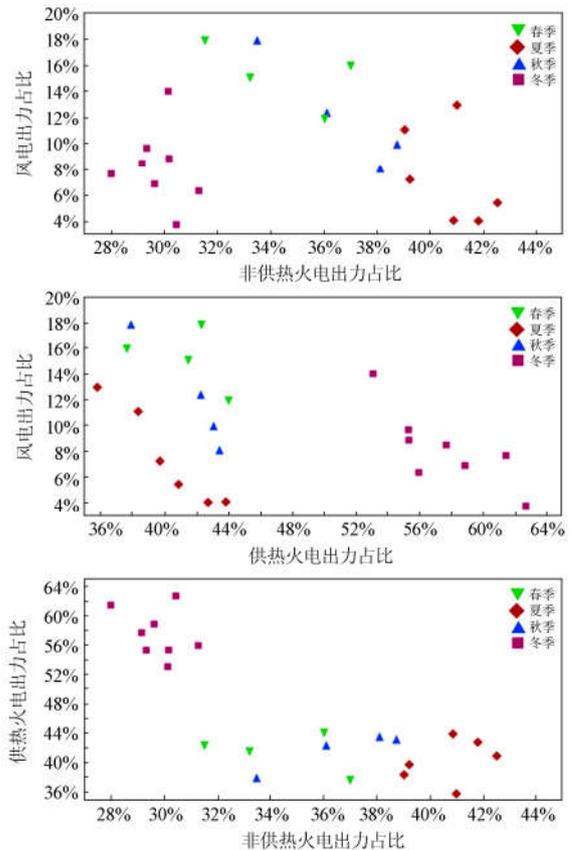


图 1 2016 和 2017 年东北电网典型日火电与风电出力分析拟合结果

Fig. 1 Analysis and fitting results of typical daily thermal power and wind power output in Northeast China Power Grid in 2016 and 2017

此外，如图 2 所示，从风电、非供热火电、供热火电三个分析单元来看：一是非供热火电与风电季节性来风有较强关联，非供热火电冬季出力较小，夏季出力较大。冬夏两季调节能力约为全网总出力的 5%，春秋两季调节能力约为全网总出力的 10%。二是供热火电受季节因素影响较大，冬季出力大，春夏秋三季出力小，调节范围不足全网出力的 10%。供热火电面临冬季降出力受限调峰能力下降而约束风电出力的情况。三是供热和非供热火电出力呈现负相关关系，供热火电冬季出力占比较高，其他三季占比较低；非供热火电出力冬季占比低，夏季高，全年波动较大。



备注：方块代表冬季(12 月、1 月、2 月)，下三角代表春季(4 月)，菱形代表夏季(7 月)，上三角代表秋季(9 月)

图 2 2016 和 2017 年东北电网典型日风电出力与非供热火电出力、供热出力矩阵分析

Fig. 2 Matrix analysis of typical daily wind power, non-heat thermal power and heat thermal power in Northeast China Power Grid in 2016 and 2017

#### 1.2 电网负荷特性

选取东北电网 2017 年春夏秋冬四个典型日负荷数据分析(如图 3)显示，负荷高峰出现在夏冬两季

的典型日, 负荷最高峰则出现在冬季典型日; 典型日负荷变化均呈现早高峰和晚高峰的双高峰特性, 而且晚高峰的负荷明显相对较大; 夏冬两季典型日最高负荷出现在 17:00 左右, 最低负荷则出现在 3:00 左右。这反映出居民生活(如采暖)需求特性, 直接导致了负荷波动特征化。尤其, 东北每年有长达 5 到 8 个月的供热期, 供热机组比例较大, 冬季全网约有 70% 以上运行容量的机组开始供热, 供热时间长, 为保证居民供热需求, 造成供热机组参与电网调峰的能力大幅度下降。

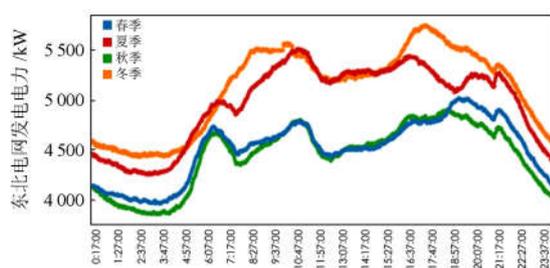


图 3 2017 年东北电网春夏秋冬四个典型日日负荷特性  
Fig. 3 Four typical daily load characteristics of Northeast China Power Grid in spring, summer, autumn and winter in 2017

另外, 2017 年底东北电网调度口径发电量最大峰谷差出现在冬季(12 月 13 日), 为 1 409 万 kW, 同比增长 5.46%, 并且有逐渐增大的态势。而且如上所述, 东北电网风火互济的特征明显, 火电是风电消纳主力, 但在火电供热期, 有效调峰电源匮乏, 弃风限电成为调峰困难时段无奈的选择, 甚至出现个别大发日风电全天受限情况, 电力系统在冬季供热期面临风电消纳难的窘境<sup>[6, 8]</sup>。因此, 有待建立科学、合理的风电消纳水平评估方法, 从而准确掌握风电消纳规模, 合理规划发展, 以期缓解甚至逐步解决风电大规模并网及消纳所带来的影响<sup>[9]</sup>。

## 2 电网调峰缺额和消纳评估分析

### 2.1 风电对系统调峰能力的影响

电源构成、电网输送能力、稳定性、风电特性等均能影响电网对风电的消纳水平<sup>[10-11]</sup>。由东北电网典型日风电出力与负荷曲线可以看出, 风电出力夜间出力大、日间出力小, 与电网用电负荷趋势相悖, 反调峰现象明显。

### 2.2 调峰缺额及风电消纳评估模型

风电弃风主要发生在冬季供暖期。因为在冬季供暖期, 火电供热机组由于受供热制约, 其最大出力和调峰能力均受限, 风电上网空间被挤占; 同时, 风电具有明显的反调峰特性, 如图 4 负荷低谷时段

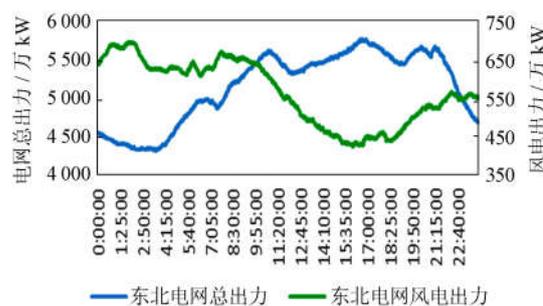


图 4 东北电网典型日风电出力与负荷特性

Fig. 4 Typical daily wind power and load characteristics of Northeast China Power Grid

出力往往较大, 风电消纳受限<sup>[12-13]</sup>。本文对此也有论述, 因此, 本次研究以东北电网 2017 年调峰能力最为困难的冬季作为研究对象, 基于冬季电网运行的最大调峰容量, 结合峰谷差, 并充分考虑满足风电机组的反调峰特性, 适当考虑联络线影响, 分析系统调峰能力能否满足系统调峰需求, 为东北风电的合理规划开发提供辅助。

#### 2.2.1 调峰原则

1) 依据国家节能发电调度和东北电力调峰辅助服务市场监管办法的相关要求, 具有调节能力的并网电源均可参与调峰。其中火电非供热和火电供热机组, 在冬季供热期, 按能力大小参与调峰, 必要时, 也是深度调峰和启停调峰电源; 冬季枯水季, 水电主要参与调峰。

2) 对于燃煤机组, 考虑其在调峰过程中煤耗等特性, 煤耗小的机组优先安排调峰(在系统负荷波动较大时, 各类机组爬坡能力是安排调峰顺序的主要考虑因素)。

3) 各类机组暂不考虑网络的安全约束, 但适当考虑联络线送受两端对调峰的影响。

4) 调峰平衡时, 按最大负荷日并参照最大峰谷差日的负荷率统筹考虑, 平衡结果为本年度调峰最严重情况。

5) 调峰平衡时旋转备用容量按最大发电负荷的 6% 考虑。

6) 将国家发改委批准的退役机组、已核准/路条电源建设项目, 以及国家能源局新能源司最新下发的新能源发展规模作为固定项目考虑。

#### 2.2.2 各类机组调峰能力

1) 根据调度运行经验, 冬季供热期, 现有火电非供热机组调峰性能按 50% 考虑; 火电供热机组按 15% 参与调峰<sup>[14]</sup>、风电受阻容量取 10%。

2) 根据调度运行经验, 常规水电、抽水蓄能的

调峰能力分别按 50%和 120%计算<sup>[15]</sup>。

3) 核电、光伏按不参与系统调峰考虑。

4) 风电按水平年最大有效出力反调峰处理。

5) 联络线对弃风影响较为复杂<sup>[16]</sup>，本文采用简化方式考虑其影响，即受入电力作为电源处理，外送电力作为负荷处理。

### 2.2.3 模型建立

东北电网冬季运行时的系统调峰能力为

$$P_{\text{sys-pc}} = W_{\text{hydro}} \times \varphi_{\text{hydro}} + W_{\text{pump}} \times \varphi_{\text{pump}} + W_{\text{n-heat}} \times \varphi_{\text{n-heat}} + W_{\text{heat}} \times \varphi_{\text{heat}} (1 - \Omega) + W_{\text{solar}} \times \varphi_{\text{solar}} + W_{\text{nuclear}} \times \varphi_{\text{nuclear}} - P_{\text{wind}} - P_{\text{receive}} \quad (1)$$

式中： $P_{\text{sys-pc}}$  为系统调峰能力； $W$  为电源装机容量； $\varphi$  为电源参与调峰系数； $\Omega$  为供热机组参与调峰受阻系数； $P_{\text{wind}}$  为全年风电最大有效出力； $P_{\text{receive}}$  为区域外受入电力。

东北电网全年最大调峰需求

$$P_{\text{demand}} = (P_{\text{Gmax}} + P_{\text{send}}) \times r + \Delta d \quad (2)$$

式中： $P_{\text{Gmax}}$  为全年全社会最大用电电力； $P_{\text{send}}$  为东北电网最大送出电力； $r$  为旋转备用率； $\Delta d$  为全年最大峰谷差。

东北电网调峰缺口

$$\Delta P = P_{\text{sys-pc}} - P_{\text{demand}} \quad (3)$$

式中， $\Delta P$  为调峰缺口。

电网风电消纳水平

$$P_{\text{wind-cont}} = P_{\text{wind}} - \Delta P \quad (4)$$

另外，考虑弃风率约束的风电消纳水平。

在不同弃风水平下，风电最大出力

$$\hat{P}_{\text{wind}} = P_{\text{wind}} \frac{1 - \hat{\eta}}{1 - \eta} \quad (5)$$

式中： $\eta$  为弃风率； $\hat{\eta}$  为期望弃风率； $\hat{P}_{\text{wind}}$  为期望弃风率下全年风电最大有效出力估计值；将式(5)分别代入式(1)、式(2)、式(3)、式(4)即可获得电网不同弃风率下的风电消纳水平。

### 2.2.4 东北电网风电调峰缺口及消纳水平

根据 2.2.3 节中模型，对东北电网 2016 年、2017 年、2020 年(预测)3 个水平年冬季运行方式下电网消纳风电规模进行分析。取  $\varphi_{\text{hydro}} = 50\%$ ， $\varphi_{\text{pump}} = 120\%$ ， $\varphi_{\text{n-heat}} = 50\%$ ， $\varphi_{\text{heat}} = 15\%$ ， $\varphi_{\text{solar}} = 0$ ， $\varphi_{\text{nuclear}} = 0$ ， $\Omega = 10\%$ ， $r = 6\%$ 。具体分析结果见表 1。

根据分析结果可知，在东北电网调峰最困难的冬季，2016 年、2017 年和 2020 年的调峰缺口分别为 423 万 kW、800 万 kW 和 1 279 万 kW，理论可消纳风电极限分别为 1 001 万 kW、835 万 kW 和 811

万 kW。由此可见，随着时间的增加，东北电网的调峰缺口呈现增长趋势，风电消纳能力逐渐下降。

上述现象出现的主要原因是因为风电与火电供热机组的比重在不断增大，而水电和抽水蓄能机组比重逐渐降低。风电具有明显的反调峰特性，会使电网的峰谷差增大；火电供热机组冬季以热定电，导致火电机组调峰能力下降；水电和抽水蓄能机组具有很好的调峰能力，但是其在电网的装机比重不断下降；这些因素使得电网的峰谷差不断增大，降低了东北电网的调峰能力，使得东北电网对风电的消纳难度不断加大。预计到 2020 年，为将东北电网的弃风率控制在 10%内，消纳 2 154 万 kW 的风电能源，东北电网将有 1 342 万 kW 的调峰缺口。

表 1 东北电网风电调峰缺口及可消纳风电电力

Table 1 Peak regulation shortage and wind power consumption in Northeast China Power Grid

单位：万 kW

项目	2016 年	2017 年	2020 年
调峰需求	1 855.21	1 829.18	2 371.34
全社会最大用电电力	5 736.81	6 203	7 774
东北送华北	300	800	1 300
最大峰谷差	1 493	1 409	1 826.9
旋转备用率	6%	6%	6%
系统调峰能力	1 431.72	1 028.80	1 090.10
常规煤电机组装机容量	3 323.16	2 681.51	3 136.9
供热煤电机组装机容量	5 640.52	6 569.67	6 988.5
常规水电装机容量	655.34	662.27	759.27
抽蓄装机容量	150	150	290
风电(最大出力反调峰)	1424	1 635	2 090.43
区外来电(俄罗斯)	75	75	75
调峰缺口	423.49	800.38	1 279.24
调峰缺口(基于弃风率达到 10%)	567.67	849.75	1 342.35
*可消纳风电上网电力	1 000.51	834.62	811.19

表 1 中：① 2020 年各电源装机容量基于已核准和已取得路条的电源项目统计；② 东北电网区域间联络线包括中俄黑河直流背靠背、东北与华北 ±500 kV 高岭直流背靠背和 2017 年投运的 ±800 kV 扎青特高压直流；③ 假设 2020 年与 2017 年弃风率一致。

## 3 提高风电消纳水平的措施和建议

分析结果显示，东北电网以火电为主的系统调峰能力有限，不能满足调峰需求，存在难以充分消纳风电的困境。风电消纳不能仅依靠火电调峰，须通过多种途径解决风电消纳问题，结合调度工作经验，可以从以下几个方面进一步提高风电消纳水平。

1) 提高现有风电外送通道负荷率, 进一步推进地区外送通道建设。协调提高东北电网与华北电网间扎鲁特高压直流和高岭背靠背直流输电负荷率, 有条件时加大低谷时段向华北电网送电电力和全年电量(实现风电跨区配置), 同时推进开展其他跨区电力合作, 促进风电的跨区消纳。文献[17]研究结果表明, 随着外送容量的增加, 系统的调峰量也逐渐增加, 当外送容量为 10 GW 时, 在风电极端反调峰的作用下, 系统有 2.774 6 GW 的调峰量。

2) 加强建设优质灵活调峰电源, 特别是抽水蓄能电源的建设, 优化调整东北电网电源构成。适度放缓东北区域电源总量建设, 加大符合国情的抽水蓄能、常规水电等优良调峰电源的建设力度<sup>[8]</sup>。抽水蓄能电站是理想有效的新能源消纳电源, 不仅能够平抑风电并网对电网稳定性的影响, 而且可以在负荷低谷风电大发时段时抽水运行, 从而实现对外送风电的消纳。根据调度运行经验可知, 每增加单位常规水电、抽水蓄能机组的装机容量, 系统的调峰能力可以分别提高 50%、120%。

3) 激励需求侧负荷参与系统调峰。在电力需求侧, 采取措施鼓励负荷侧的高耗能企业在负荷低谷时段用电参与调峰; 在供暖需求侧, 采用集中风电供暖, 调整风电与热电联产机组的比例构成, 提升风电在热网总采暖热负荷中参与度, 实现节能减排的同时提高电网风电消纳水平<sup>[18]</sup>。文献[19]研究结果表明, 采用分时电价和储热 CHP 联合优化的措施, 风电消纳量能比传统方式下提高 32.3%, 弃风率低至 10%。

4) 完善东北电网调峰市场化补偿机制。未来较长一段时间内火电依然是调峰主力, 但是目前的调峰补偿标准难以充分调动火电企业的调峰积极性, 须进一步完善调峰市场化补偿机制, 更加有效地刺激发电企业积极参与调峰; 同时, 充分利用全网调峰资源, 必要时调整省间联络线计划, 加大省间调峰互济支援和调峰交易, 进一步挖掘东北电网风电消纳潜力。文献[20]研究结果表明, 火电机组有偿调峰补偿金额同比增长 26%, 机组综合调峰率提升 1.31%, 对应多接纳风电电力 25 万 kW, 这说明供暖初期热电机组的调峰能力得到了充分利用, 解决了长期以来热电企业以供热为由消极参与电网调峰的问题。

## 4 结论

本文从系统调峰角度, 基于东北电网电源、负荷、网架和风电出力特性等, 分析了东北电网调峰缺额, 并在此基础上提出了考虑系统调峰能力约束

的电网风电消纳水平评估方法。该方法原理简单、易于理解、便于推广实践。所提方法在辅助有关部门制定风力发电发展规模、电力系统规划时具有积极的参考价值。实际应用中, 鉴于电源、网架和负荷对风电消纳评估的影响, 应尽可能根据电源、网架实际投运进度和负荷预测精度, 提高计量电网消纳风电规模的准确度。规划期通过增加优质灵活调峰电源、提升地区外送通道建设力度、加强需求侧管理、减小峰谷差、完善东北电网调峰市场化补偿机制等措施, 必将促使东北电网风电消纳水平得到大幅提高。

## 参考文献

- [1] ALBINO V, ARDITO L, DANGELICO R M, et al. Understanding the development trends of low-carbon energy technologies: a patent analysis[J]. Applied Energy, 2014, 135: 836-854.
- [2] VAN KOOTEN G C, TIMILSINA G R. Wind power development: economics and policies[J]. Energy Policy, 2013, 61: 642-652.
- [3] 和萍. 大规模风电接入对电力系统稳定性影响及控制措施研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.  
HE Ping. Investigations on impacts and control strategies of power system stability with wind power integration[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [4] 谢国辉, 樊昊. 东北地区风电运行消纳形势及原因分析[J]. 中国电力, 2014, 47(10): 152-155.  
XIE Guohui, FAN Hao. Analysis on the situations and reasons of wind power operation and consumption in Northeast China[J]. Electric Power, 2014, 47(10): 152-155.
- [5] 东北电网调度中心. 2018 年国家电网公司系统电网运行方式(东北分册)[R].  
Northeast Power Grid Dispatching Center. Operation mode of state grid system in 2018 (Northeast Branch)[R].
- [6] 段贵钟, 秦文萍, 逯瑞鹏, 等. 考虑风电接入与负荷不确定性的静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 108-114.  
DUAN Guizhong, QIN Wenping, LU Ruipeng, et al. Static voltage stability analysis considering the wind power and uncertainty of load[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 108-114.
- [7] 国家能源局. 关于 2017 年度风电投资监测预警结果的通知[EB/OL]. [2017]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201702/t20170222\\_2604.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201702/t20170222_2604.htm).  
National Energy Administration. Notice on wind power investment monitoring and warming results in 2017[EB/OL]. [2017]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201702/t20170222\\_2604.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201702/t20170222_2604.htm).

- [8] 高重晖, 吴希, 范国英, 等. 大规模风电接入吉林电网风电消纳能力分析[J]. 吉林电力, 2014, 42(5): 1-5.  
GAO Chonghui, WU Xi, FAN Guoying, et al. Analysis on Jilin wind power consumption ability after large scale integration[J]. Jilin Electric Power, 2014, 42(5): 1-5.
- [9] 张程飞, 黄俊辉, 谢珍建, 等. 电网风电接纳能力评估方法综述[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 99-105.  
ZHANG Chengfei, HUANG Junhui, XIE Zhenjian, et al. A review on evaluation methods of power grid's wind power accommodation capacity[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(3): 99-105.
- [10] 张正陵. 中国“十三五”新能源并网消纳形势、对策研究及多情景运行模拟分析[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 2-9.  
ZHANG Zhengling. Research on situation and countermeasures of new energy integration in the 13th five-year plan period and its multi-scenario simulation[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 2-9.
- [11] 王艺博, 蔡国伟, 郑存龙, 等. 考虑合理弃风的风电消纳方法研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(11): 45-50.  
WANG Yibo, CAI Guowei, ZHENG Cunlong, et al. Study on the accommodation approach of wind power based on rational wind power casting[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(11): 45-50.
- [12] 吕泉, 王伟, 韩水, 等. 基于调峰能力分析的电网弃风情况评估方法[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1887-1894.  
LÜ Quan, WANG Wei, HAN Shui, et al. A new evaluation method for wind power curtailment based on analysis of system regulation capability[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1887-1894.
- [13] 吴冠男, 张明理, 徐建源, 等. 适用于评估风电接纳能力的时序生产模拟算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 151-157.  
WU Guannan, ZHANG Mingli, XU Jianyuan, et al. Time series production algorithm for evaluating wind power accommodation capacity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 151-157.
- [14] 郑迎春, 刘新元. 2015年忻朔电网风电接纳能力分析[J]. 山西电力, 2014(5): 8-10.  
ZHENG Yingchun, LIU Xinyuan. The analysis of wind power acceptable capacity of Xin-shuo Power Grid in 2015[J]. Shanxi Electric Power, 2014(5): 8-10.
- [15] 刘故帅, 肖昇瑶, 贺禹强, 等. 考虑新能源类型的电力系统多目标并网优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 31-37.  
LIU Gushuai, XIAO Yiyao, HE Yuqiang, et al. Multi-objective optimal method considering types of grid connected new energy of electric power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 31-37.
- [16] 牛东晓, 李建锋, 魏林君, 等. 跨区电网中风电消纳影响因素分析及综合评估方法研究[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1087-1093.  
NIU Dongxiao, LI Jianfeng, WEI Linjun, et al. Study on technical factors analysis and overall evaluation method regarding wind power integration in trans-provincial power grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1087-1093.
- [17] 吴雄, 王秀丽, 李骏, 等. 考虑风电外送的省级系统调峰分析模型[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1578-1583.  
WU Xiong, WANG Xiuli, LI Jun, et al. A model to analyze peak load regulation of provincial power system considering sending-out of wind power[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1578-1583.
- [18] 雷涛. 需求侧管理对电力节能减排的影响分析与优化模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.  
LEI Tao. The study on the influence analysis and optimization model for demand management on power energy conservation and saving emission[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [19] 黄培东. 考虑需求响应的风电消纳模型研究[D]. 成都: 西华大学, 2017.  
HUANG Peidong. Study the model of wind power accommodation considering demand response[D]. Chengdu: Xihua University, 2017.
- [20] 李正文, 刘刚, 许静, 等. 一种适用于多种电源结构的电力调峰辅助服务市场[J]. 东北电力技术, 2017, 38(8): 1-5.  
LI Zhengwen, LIU Gang, XU Jing, et al. One market of a variety of power structures for peaking regulation ancillary service[J]. Northeast Electric Power Technology, 2017, 38(8): 1-5.

收稿日期: 2018-11-23; 修回日期: 2019-01-28

作者简介:

孙 勇(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统控制; E-mail: yong-sun@sgxy.sgcc.com

魏 敏(1989—), 女, 硕士, 中级工程师, 研究方向为抽水蓄能与新能源; E-mail: weimin426@yeah.net

王 磊(1986—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为智能电网。E-mail: l-wang@sgxy.sgc.com.cn

(编辑 张爱琴)